

Escola de Física-FCUP
***A física do grafeno: uma perspectiva na
primeira pessoa***

Nuno Miguel Peres

peres@fisica.uminho.pt

Universidade do Minho

O passeio aleatório

Muito do que nos acontece – sucesso na carreira, nos investimentos, e nas decisões pessoais, quer grande quer pequeno – é tanto o resultado de factores aleatórios como de capacidade, preparação e trabalho árduo.

Leonard Mlodinow in *The Drunkard's walk*

O passeio aleatório

Muito do que nos acontece – sucesso na carreira, nos investimentos, e nas decisões pessoais, quer grande quer pequeno – é tanto o resultado de factores aleatórios como de capacidade, preparação e trabalho árduo.

Leonard Mlodinow in *The Drunkard's walk*

Não quer dizer que a habilidade não importa – é um dos factores que aumenta as chances de sucesso – mas a ligação entre acções e resultados não é tão directa como gostaríamos de acreditar

Leonard Mlodinow in *The Drunkard's walk*

Quanto tempo para cozinhar um físico



Licenciatura: 3 anos

Quanto tempo para cozinhar um físico



Licenciatura: 3 anos

Mestrado: 2 anos

Quanto tempo para cozinhar um físico



Licenciatura: 3 anos

Mestrado: 2 anos

Doutoramento: 3-4 anos com bolsa

Quanto tempo para cozinhar um físico



Licenciatura: 3 anos

Mestrado: 2 anos

Doutoramento: 3-4 anos com bolsa

Pós-doutoramento: : 1-3 anos com bolsa

Características de um físico

Curioso ... às vezes visionário

Características de um físico

Curioso ... às vezes visionário

Incansável na procura de respostas

Características de um físico

Curioso ... às vezes visionário

Incansável na procura de respostas

Imaginativo na proposta de soluções

Características de um físico

Curioso ... às vezes visionário

Incansável na procura de respostas

Imaginativo na proposta de soluções

Perseverante nas dificuldades

O trabalho de um físico

Questionar

O trabalho de um físico

Questionar

Investigar

O trabalho de um físico

Questionar

Investigar

Resolver problemas

O trabalho de um físico

Questionar

Investigar

Resolver problemas

Publicar os resultados obtidos em revistas científicas

Cabeçalho de um trabalho científico

Vol 438|10 November 2005|doi:10.1038/nature04233

nature

LETTERS

Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene

K. S. Novoselov¹, A. K. Geim¹, S. V. Morozov², D. Jiang¹, M. I. Katsnelson³, I. V. Grigorieva¹, S. V. Dubonos²
& A. A. Firsov²

Interpretemos cada uma das palavras

Outro exemplo

REVIEWS OF MODERN PHYSICS, VOLUME 81, JANUARY–MARCH 2009

The electronic properties of graphene

A. H. Castro Neto

Department of Physics, Boston University, 590 Commonwealth Avenue, Boston, Massachusetts 02215, USA

F. Guinea

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC, Cantoblanco, E-28049 Madrid, Spain

N. M. R. Peres

Center of Physics and Department of Physics, Universidade do Minho, P-4710-057, Braga, Portugal

K. S. Novoselov and A. K. Geim

Department of Physics and Astronomy, University of Manchester, Manchester, M13 9PL, United Kingdom

(Published 14 January 2009)

This article reviews the basic theoretical aspects of graphene, a one-atom-thick allotrope of carbon, with unusual two-dimensional Dirac-like electronic excitations. The Dirac electrons can be controlled by application of external electric and magnetic fields, or by altering sample geometry and/or topology. The Dirac electrons behave in unusual ways in tunneling, confinement, and the integer quantum Hall effect. The electronic properties of graphene stacks are discussed and vary with stacking order and number of layers. Edge (surface) states in graphene depend on the edge termination (zigzag or armchair) and affect the physical properties of nanoribbons. Different types of disorder modify the Dirac equation leading to unusual spectroscopic and transport properties. The effects of electron-electron and electron-phonon interactions in single layer and multilayer graphene are also presented.

DOI: [10.1103/RevModPhys.81.109](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.109)

PACS number(s): 81.05.Uw, 73.20.-r, 03.65.Pm, 82.45.Mp

Espinhos associados ao trabalho científico

Prioridade na publicação – *There is no second place*

Espinhos associados ao trabalho científico

Prioridade na publicação – *There is no second place*

Falta de reconhecimento do trabalho feito

Espinhos associados ao trabalho científico

Prioridade na publicação – *There is no second place*

Falta de reconhecimento do trabalho feito

Ameaça ao prestígio científico

Espinhos associados ao trabalho científico

Prioridade na publicação – *There is no second place*

Falta de reconhecimento do trabalho feito

Ameaça ao prestígio científico

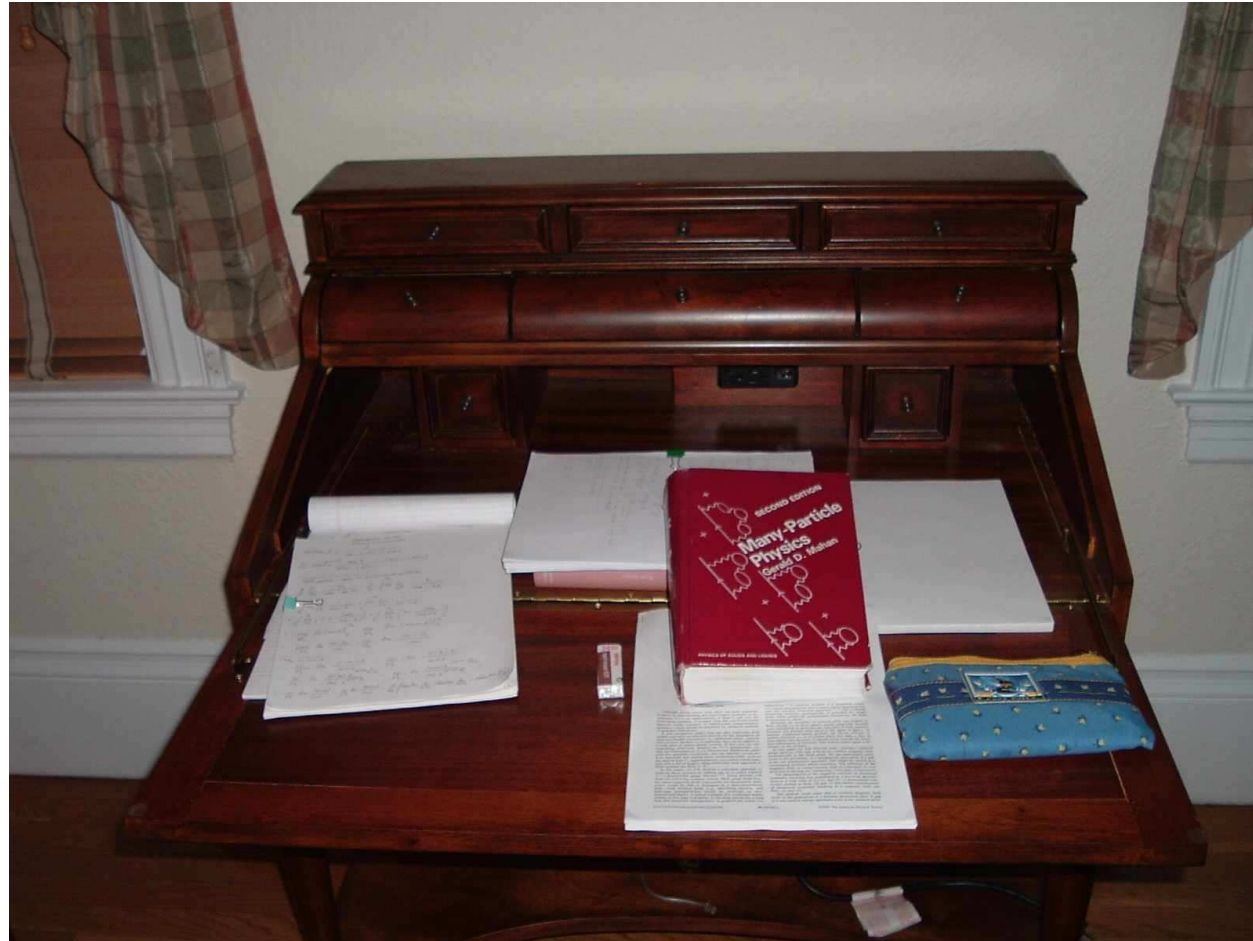
Pressão constante para produzir trabalho original

Um físico: Andre Geim



O físico que levitou sapos.

Uma mesa de trabalho: Boston 2005



O chão de uma casa de banho: bar Pot Belly em Washington D.C.



Poderá haver física no chão de uma casa de banho?

Será possível ?

Será possível existir um material apenas com a espessura de apenas um ÚNICO átomo?

Será possível ?

Será possível existir um material apenas com a espessura de apenas um ÚNICO átomo?

E se tal material existir será que o poderemos ver?

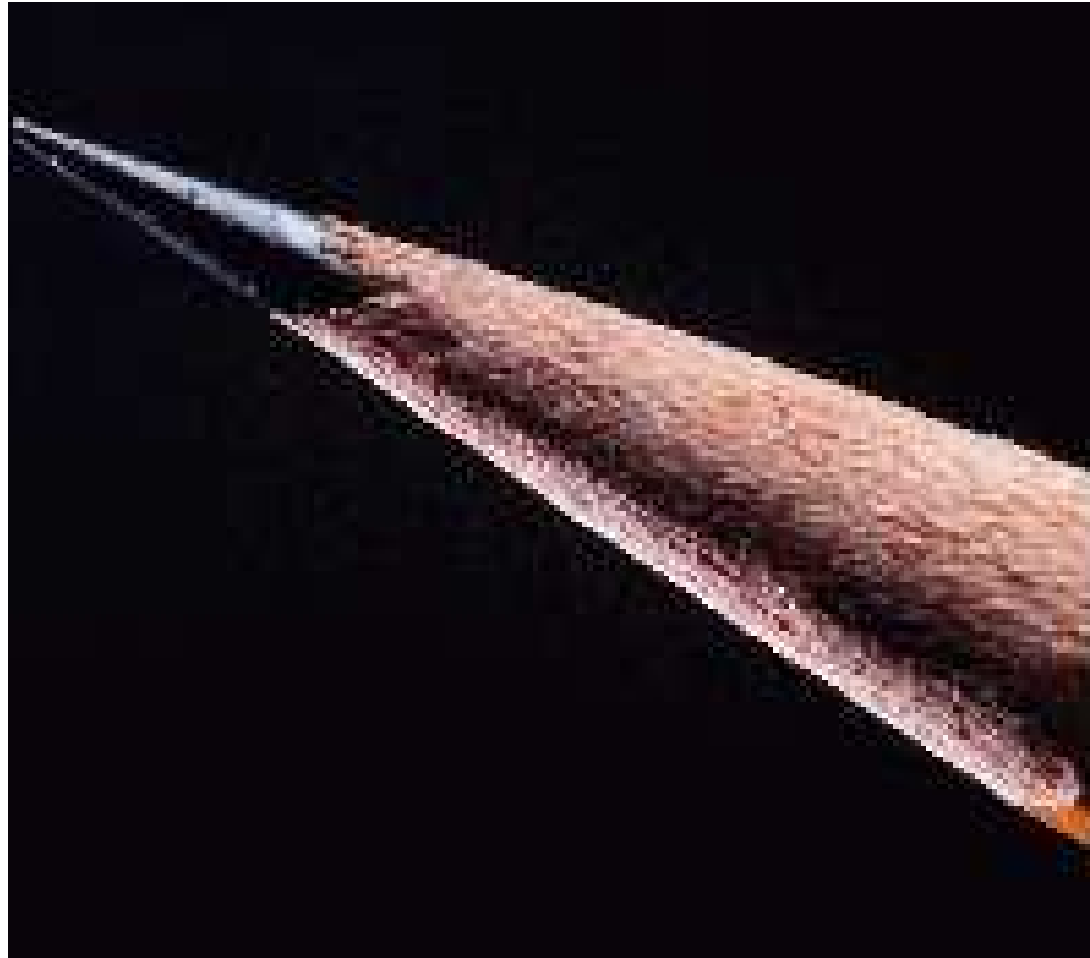
Será possível ?

Será possível existir um material apenas com a espessura de apenas um ÚNICO átomo?

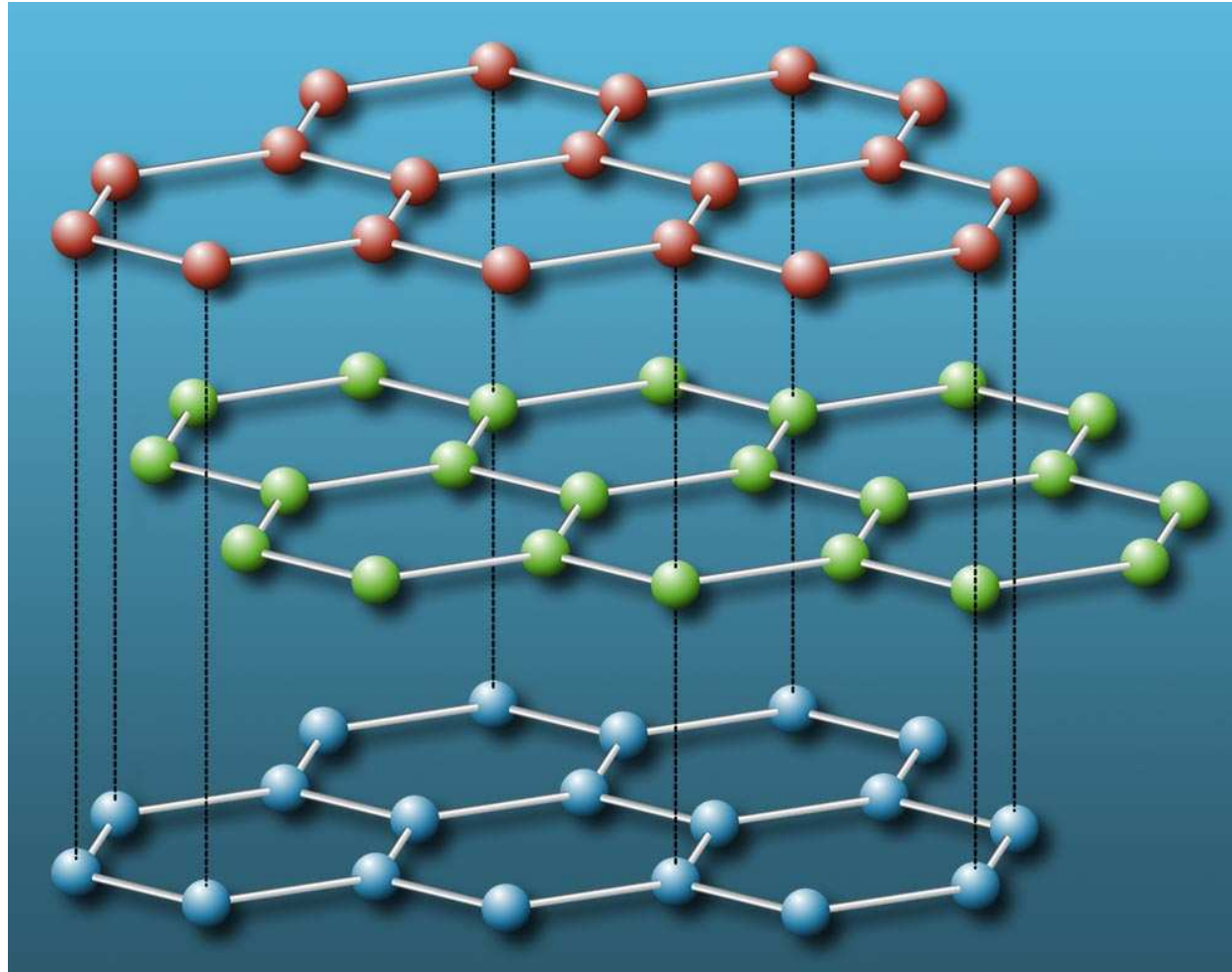
E se tal material existir será que o poderemos ver?

E que significa ver alguma coisa?

Um lápis. De que é feito o bico?



Estrutura da grafite

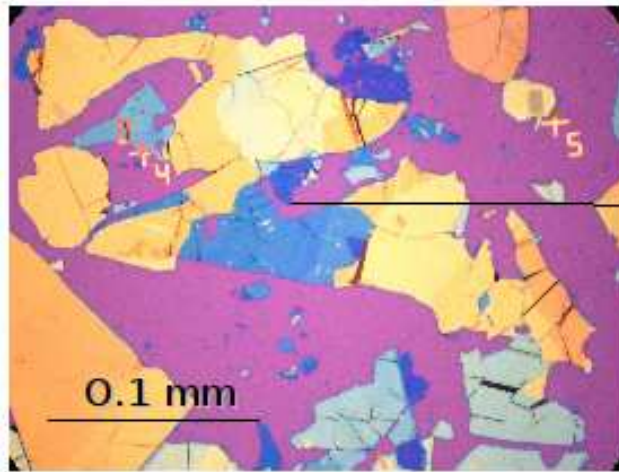


voltar

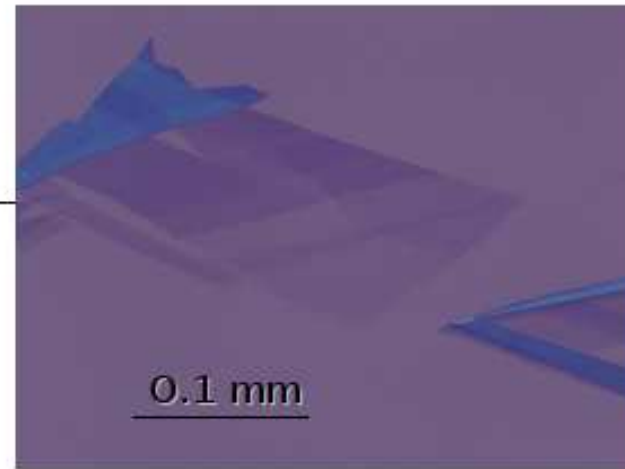
Escrevendo ...

Um lápis + um vidro + um risco no vidro = ...

Uma imagem óptica



graphite trace
on oxidized Si wafer

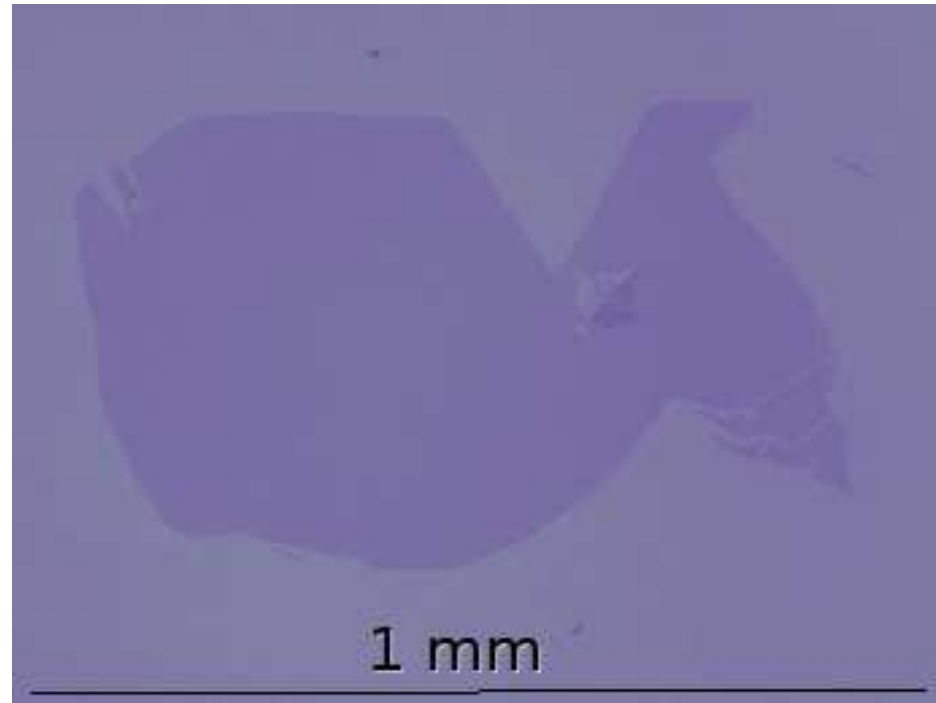


with lots of perseverance

Diâmetro de um cabelo humano $\sim 100 \mu\text{m} = 0.1 \text{ mm}$.

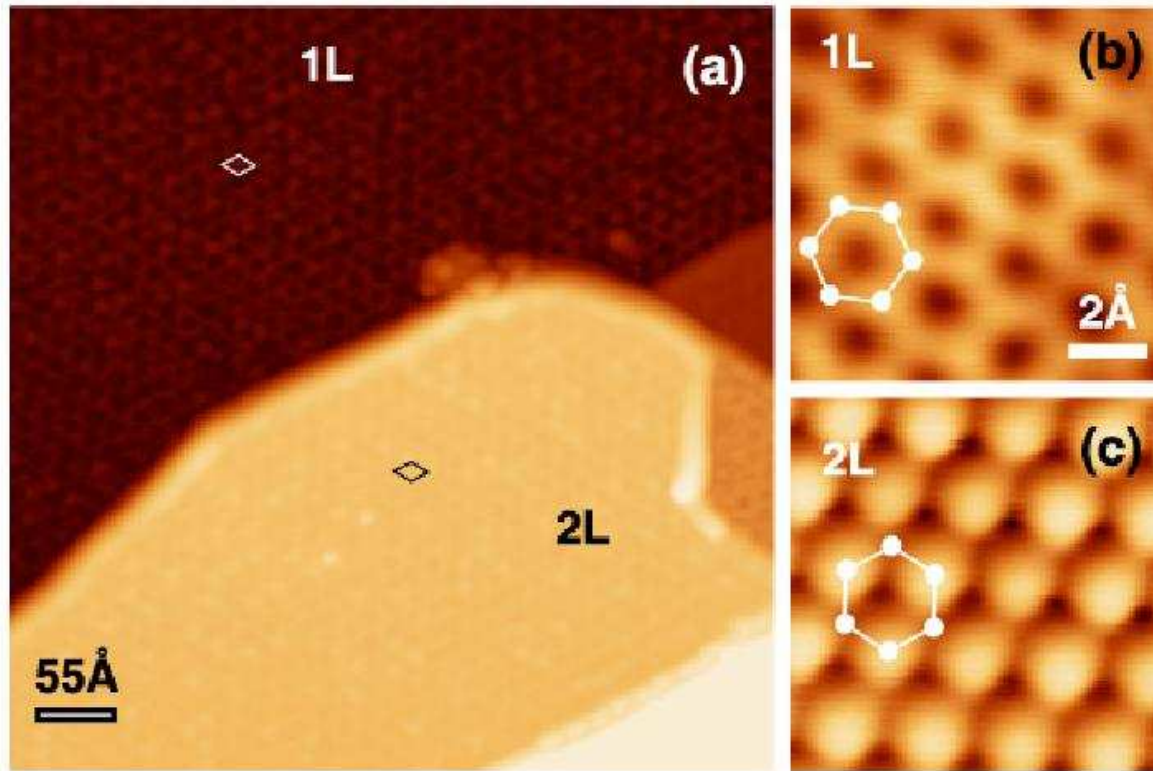
Qual a relação entre esta imagem e o chão da casa de banho?

Outra imagem óptica



Cortesia de Andre Geim

Uma imagem electrónica: ver mais perto



Brar *et al.*, APL 91, 122102 (2007)

Europhysics prize 2008



Andre Geim

Universidade de Manchester, Reino Unido.

O grafeno foi isolado no final de 2004.



Konstantin Novoselov

A publicação: Science, Outubro 2004

Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films

**K. S. Novoselov,¹ A. K. Geim,^{1*} S. V. Morozov,² D. Jiang,¹
Y. Zhang,¹ S. V. Dubonos,² I. V. Grigorieva,¹ A. A. Firsov²**

We describe monocrystalline graphitic films, which are a few atoms thick but are nonetheless stable under ambient conditions, metallic, and of remarkably high quality. The films are found to be a two-dimensional semimetal with a tiny overlap between valence and conductance bands, and they exhibit a strong ambipolar electric field effect such that electrons and holes in concentrations up to 10^{13} per square centimeter and with room-temperature mobilities of $\sim 10,000$ square centimeters per volt-second can be induced by applying gate voltage.

O meu trabalho

O meu trabalho consiste em estudar conductores eléctricos, ou seja, materiais condutores da corrente eléctrica.

O meu trabalho

O meu trabalho consiste em estudar conductores eléctricos, ou seja, materiais condutores da corrente eléctrica.

Como a corrente eléctrica é devida aos electrões, então eu:

O meu trabalho

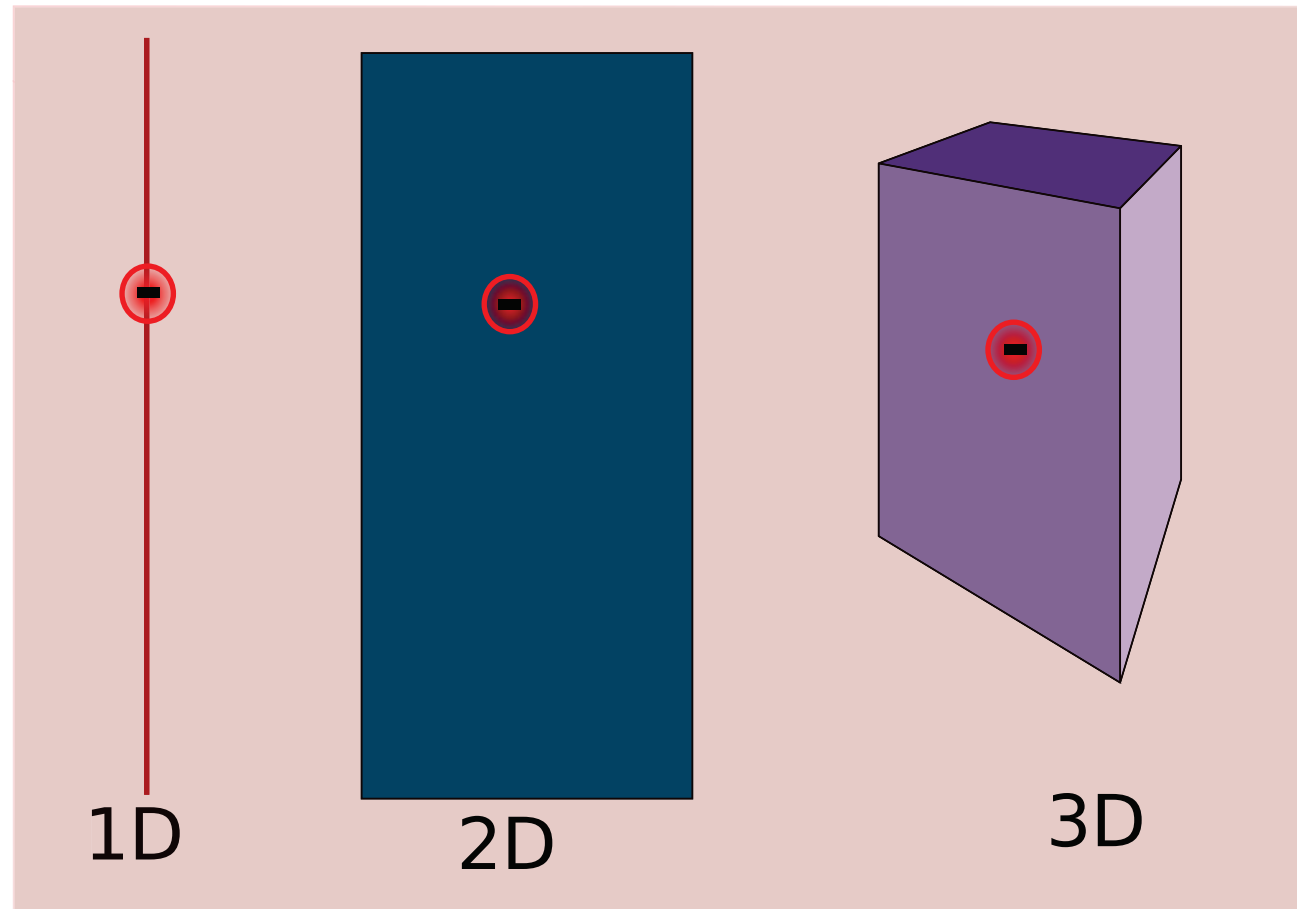
O meu trabalho consiste em estudar conductores eléctricos, ou seja, materiais condutores da corrente eléctrica.

Como a corrente eléctrica é devida aos electrões, então eu:

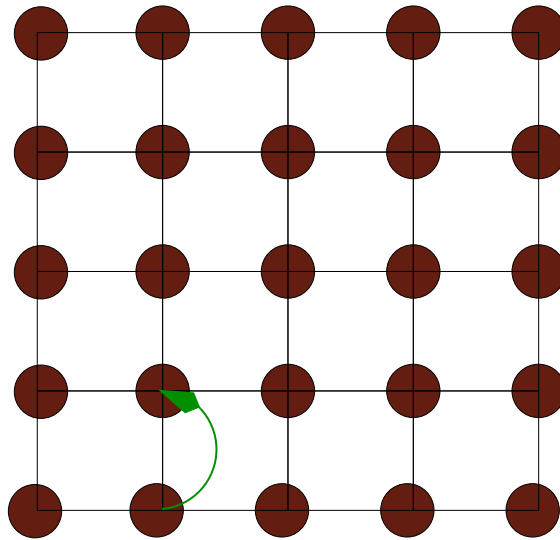
estudo as **propriedades ELECTRÓNICAS** dos materiais.

Click!

Materiais 1D, 2D e 3D

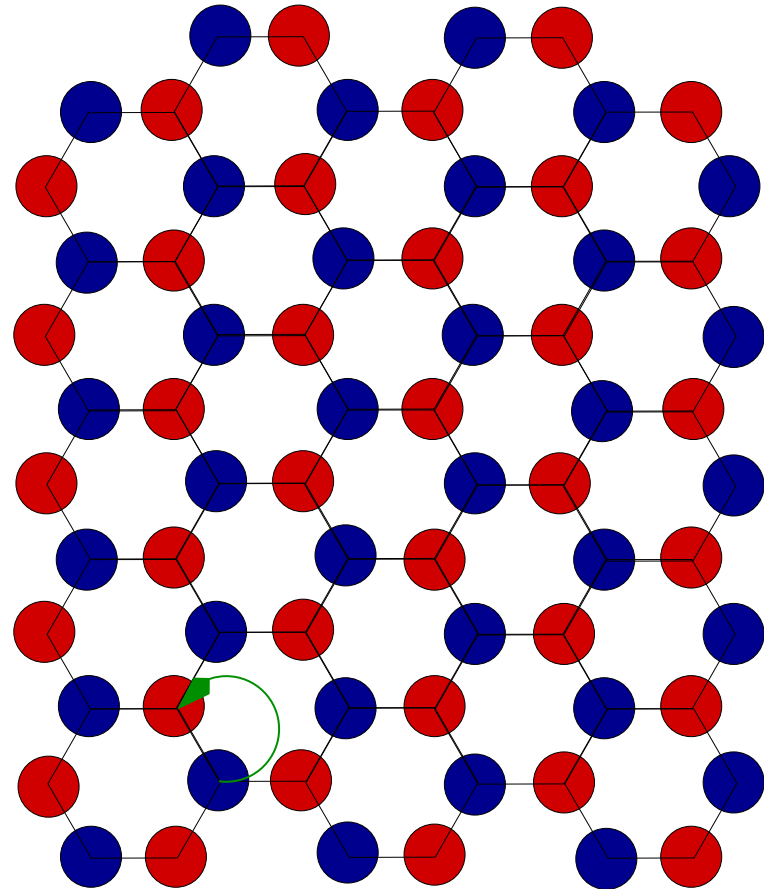


Estruturas de sistemas 2D



*Atomos organizados
numa rede quadrada*

Salto de electroes



*Atomos organizados
numa rede hexagonal*

Submetido em Março de 2004

PHYSICAL REVIEW B **70**, 195122 (2004)

Phase diagram and magnetic collective excitations of the Hubbard model for graphene sheets and layers

N. M. R. Peres,^{1,2} M. A. N. Araújo,^{2,3} and Daniel Bozi^{1,2}

¹*Departamento de Física, Universidade do Minho, P-4710-057, Braga, Portugal*

²*GCEP-Center of Physics, Universidade do Minho, P-4710-057, Braga, Portugal*

³*Departamento de Física, Universidade de Évora, P-7000, Évora, Portugal*

(Received 15 March 2004; revised manuscript received 12 May 2004; published 29 November 2004)

Acreditava ser possível.

O problema do isolamento científico.

Trabalho académico.

Boston, Janeiro de 2005



Ainda ignorante sobre a existência do grafeno!

Com tanta neve não há outro remédio



Trabalho em equipa



Francisco Guinea

Antônio Castro Neto

Sem café isto não funciona

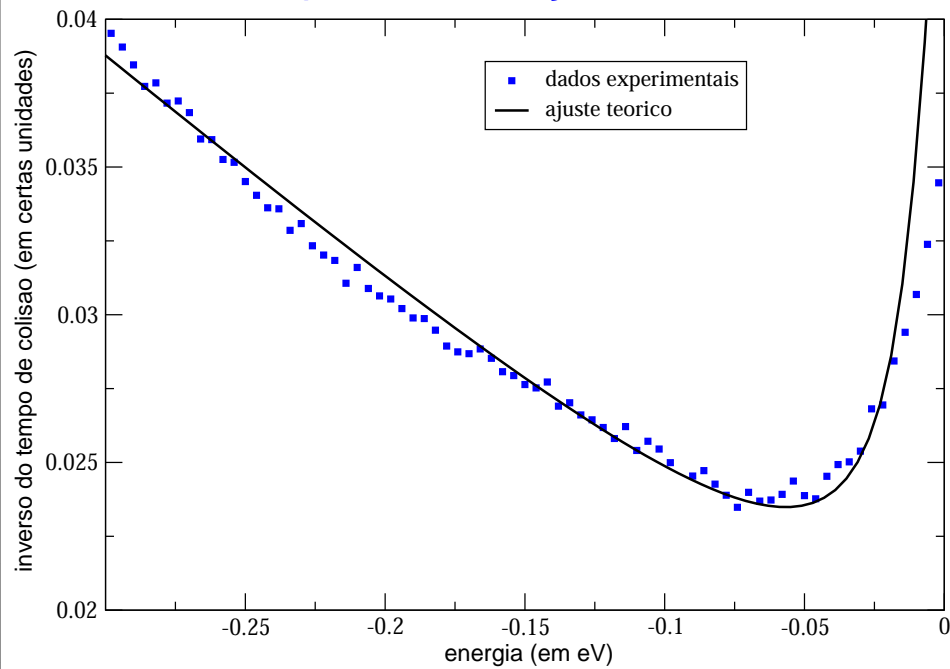


O chá das 5 h também conta



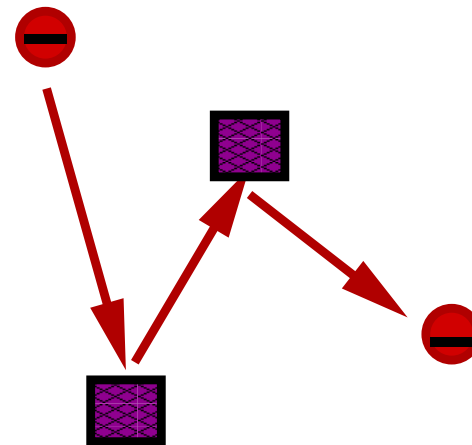
A física é uma ciência experimental

Inverso do tempo de relaxação



Boston, Janeiro de 2005

grafite



Dos dados experimentais à publicação

PHYSICAL REVIEW B 73, 125411 (2006)

Electronic properties of disordered two-dimensional carbon

N. M. R. Peres,^{1,2} F. Guinea,^{1,3} and A. H. Castro Neto¹

¹*Department of Physics, Boston University, 590 Commonwealth Avenue, Boston, Massachusetts 02215, USA*

²*Center of Physics and Departamento de Física, Universidade do Minho, P-4710-057, Braga, Portugal*

³*Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid, CSIC, Cantoblanco, E-28049 Madrid, Spain*

(Received 2 December 2005; published 16 March 2006)

Two-dimensional carbon, or graphene, is a semimetal that presents unusual low-energy electronic excitations described in terms of Dirac fermions. We analyze in a self-consistent way the effects of localized (impurities or vacancies) and extended (edges or grain boundaries) defects on the electronic and transport properties of graphene. On the one hand, point defects induce a finite elastic lifetime at low energies with the enhancement of the electronic density of states close to the Fermi level. Localized disorder leads to a universal, disorder independent, electrical conductivity at low temperatures, of the order of the quantum of conductance. The static conductivity increases with temperature and shows oscillations in the presence of a magnetic field. The graphene magnetic susceptibility is temperature dependent (unlike an ordinary metal) and also increases with the amount of defects. Optical transport properties are also calculated in detail. On the other hand, extended defects induce localized states near the Fermi level. In the absence of electron-hole symmetry, these states lead to a transfer of charge between the defects and the bulk, the phenomenon we call self-doping. The role of electron-electron interactions in controlling self-doping is also analyzed. We also discuss the integer and fractional quantum Hall effect in graphene, the role played by the edge states induced by a magnetic field, and their relation to the almost field independent surface states induced at boundaries. The possibility of magnetism in graphene, in the presence of short-range electron-electron interactions and disorder is also analyzed.

Nature/rejeitado



Science/rejeitado



Phys. Rev. Lett./rejeitado



Phys. Rev. B/aceite

Uma equipa maior e o papel da FCUP

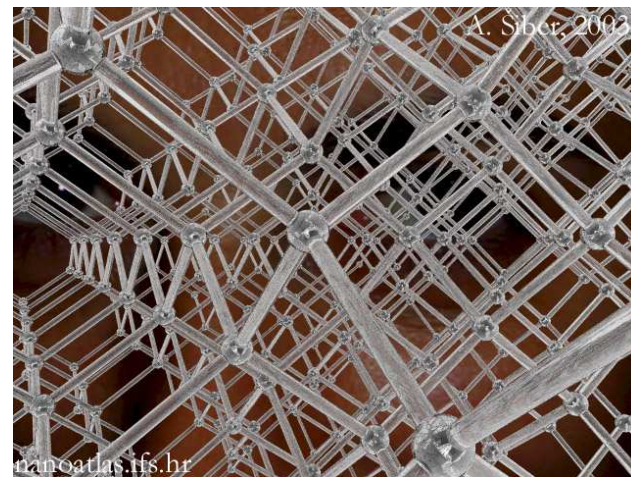
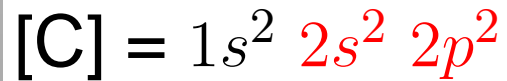


Uma visita aos materiais de carbono

Quais são as formas alotrópicas do Carbono?

Isto é, Carbono puro.

Diamante



A estrutura é tetraédrica e é feita à custa de uma mistura de orbitais atômicas: sp^3 ($\theta \sim 109^\circ$). É um isolador.

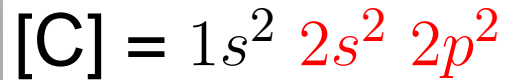
Primeiramente encontrados na Índia, há cerca de 3000-6000 anos.

Em “Os homens preferem as loiras”

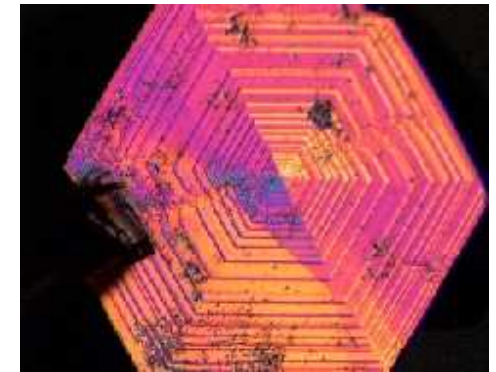
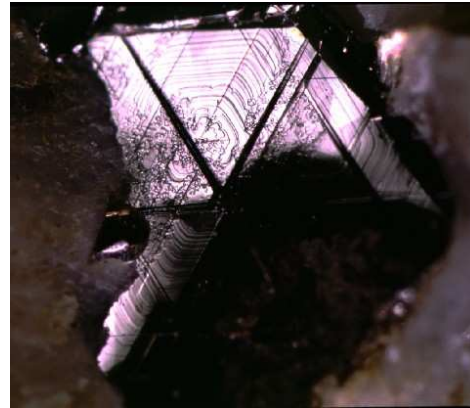


**“Diamonds Are a Girl’s
Best Friend”**

Grafite



(2 mm – 0.5 mm)



A estrutura é hexagonal e é feita à custa de uma mistura de orbitais atômicas: sp^2 ($\theta = 120^\circ$). A orbital p_z dá origem a **metallicidade**.

Notas sobre a história da grafite

A descoberta da grafite *apenas* ocorreu em **1564**! Perto de Borrowdale.



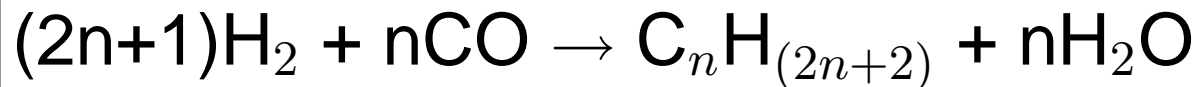
Os lápis antigos (*stylus*, Mesopotâmia) eram feitos de chumbo.

A qualidade da grafite de Borrowdale permitiu à Inglaterra o monopólio do lápis.

Apenas em 1662, em Nuremberga, Alemanha, se conseguiu obter pó de grafite a partir de grafite de baixa qualidade.

Aplicações da grafite

1. Lápis
2. Lubrificantes
3. Moderador em reactores nucleares
4. **Produção de petróleo: processo de Fisher-Tropsch.**



Nos E.U.A. há 10^{12} ton — > um bilião.

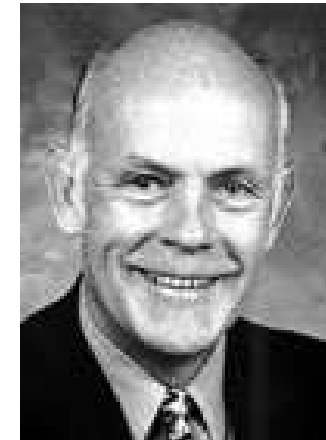
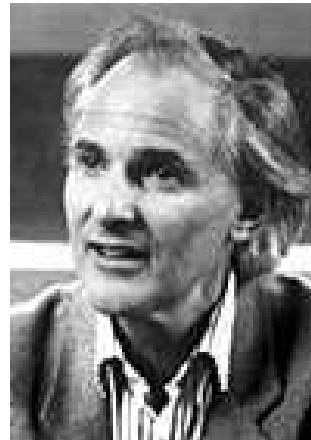
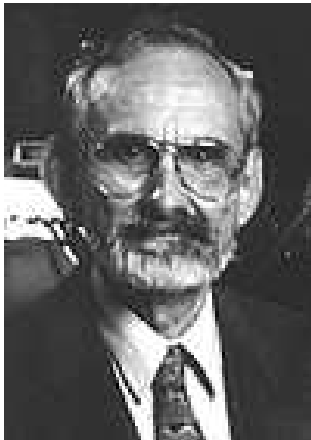
Mina de Borrowdale



Que mais há?

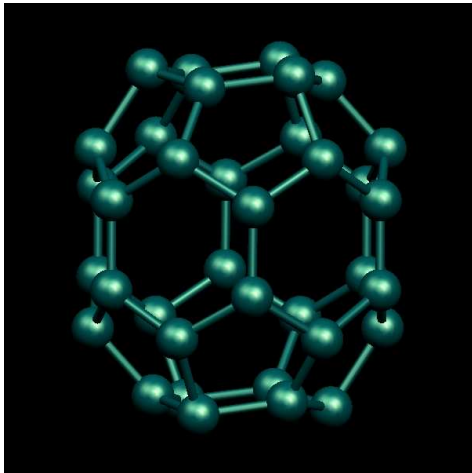
Curl, Kroto e Smalley

for their discovery of fullerenes (1985). (Nobel em 1996)

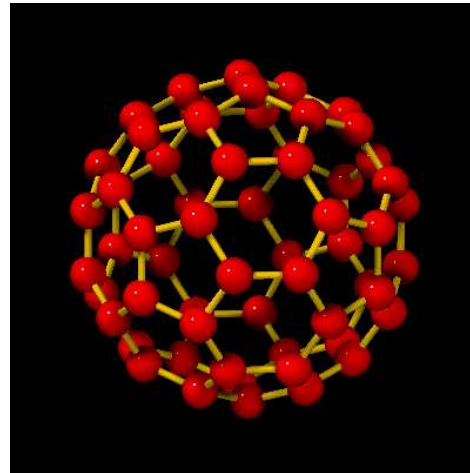


(Richard Smalley faleceu em 2005)

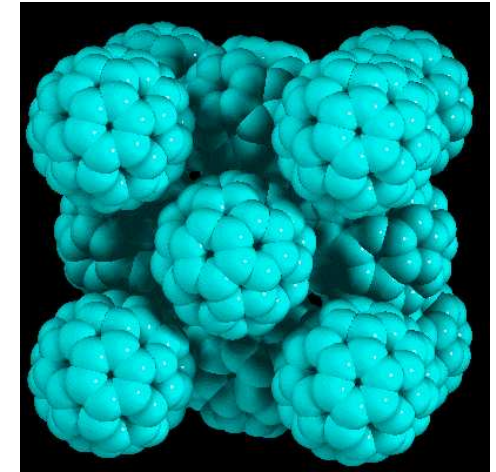
Fulerenos



C36

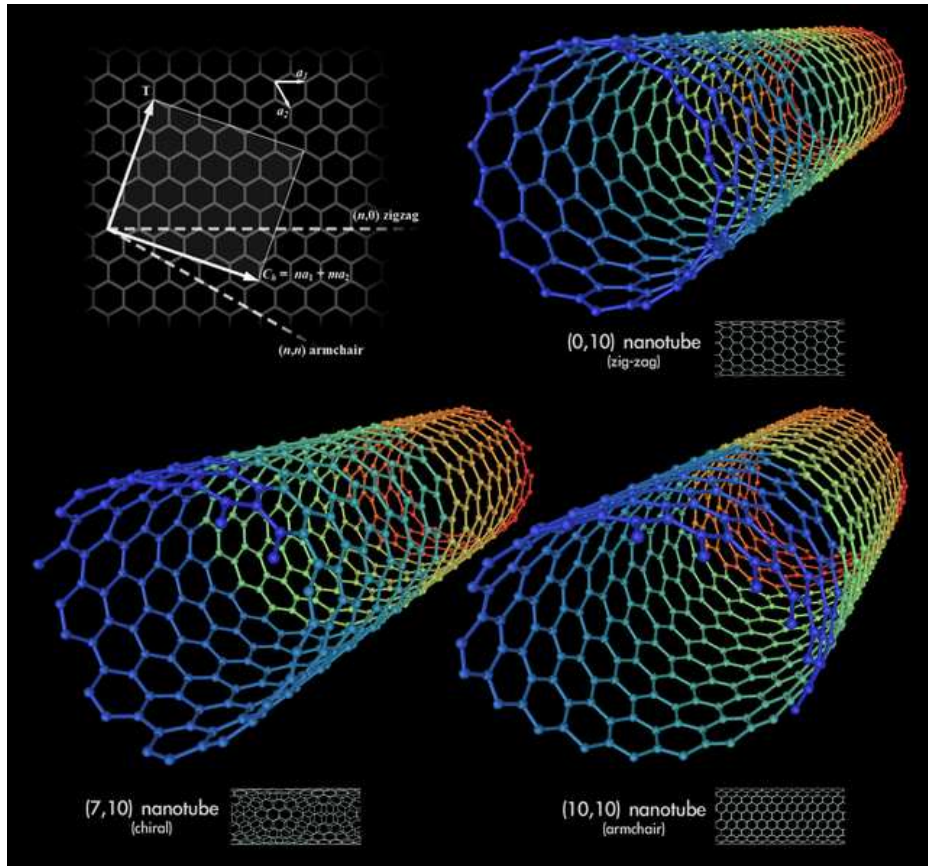


C60



C60 a 153 K
(CFC)

Nanotubos (1991-93)



Sumio Iijima (1939-)

Que mais ?

Que mais ?

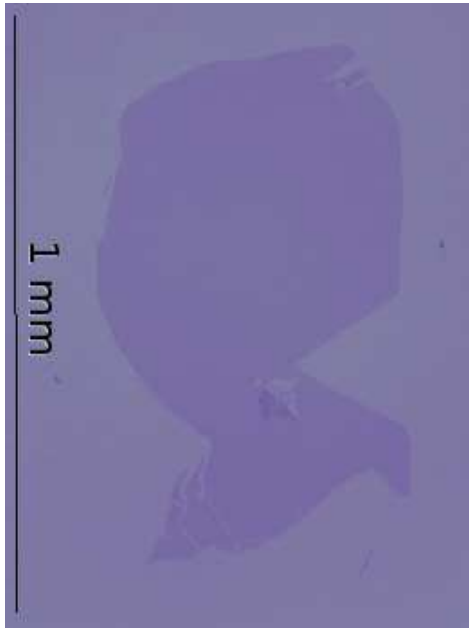
Ufa! ... e ainda há mais ?

Que mais ?

Ufa! ... e ainda há mais ?

Há mais uma novidade! E vocês já sabem a resposta.

Grafeno: um verdadeiro cristal bidimensional



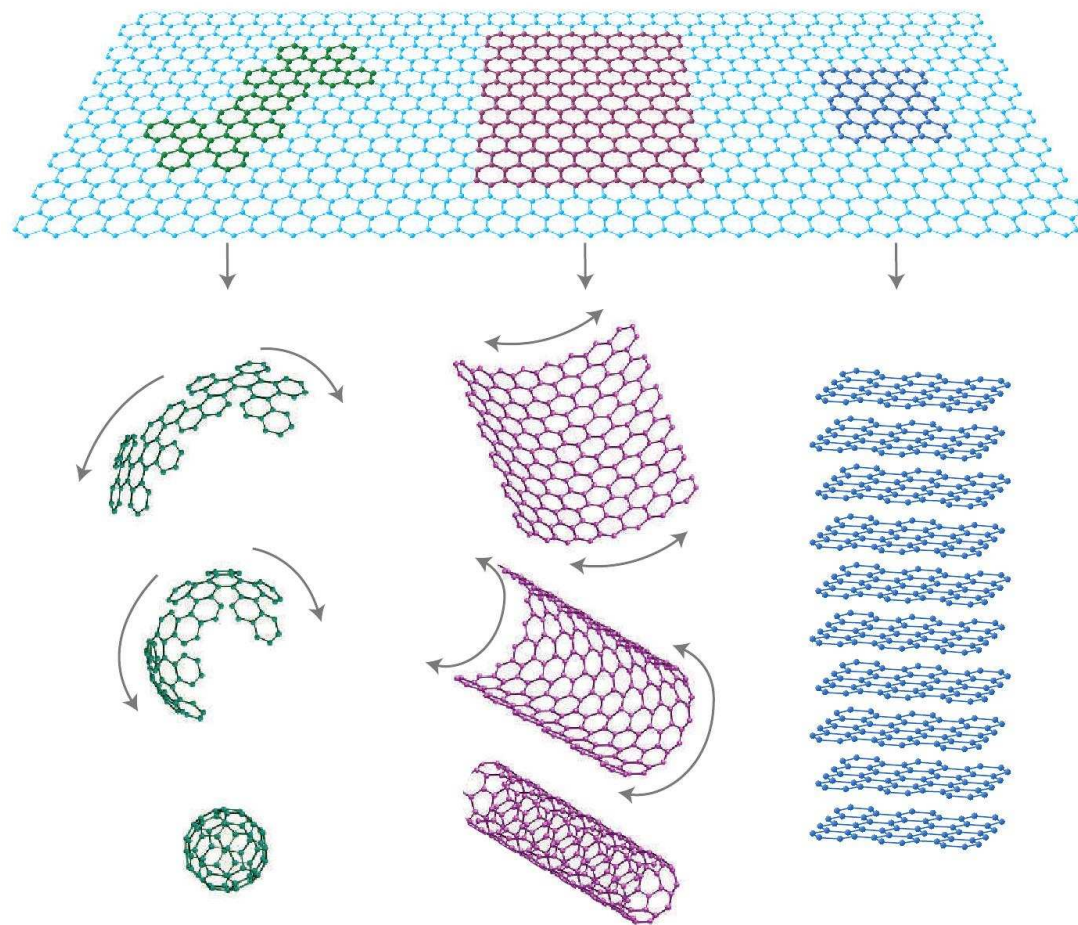
comprimento C-C 1.42 Å.
Espessura \sim 0.23 Å.

Rede de favo de mel



Click!

Mãe



Mudando de assunto

Hexógonos, matemática, biologia e física

Leonardo de Pisa (1170-1250)

A série de Fibonacci :

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, ...

$$1+1=2$$

$$1+2=3$$

$$2+3=5$$

$$3+5=8$$

Abelhas

Rainha



Zagão



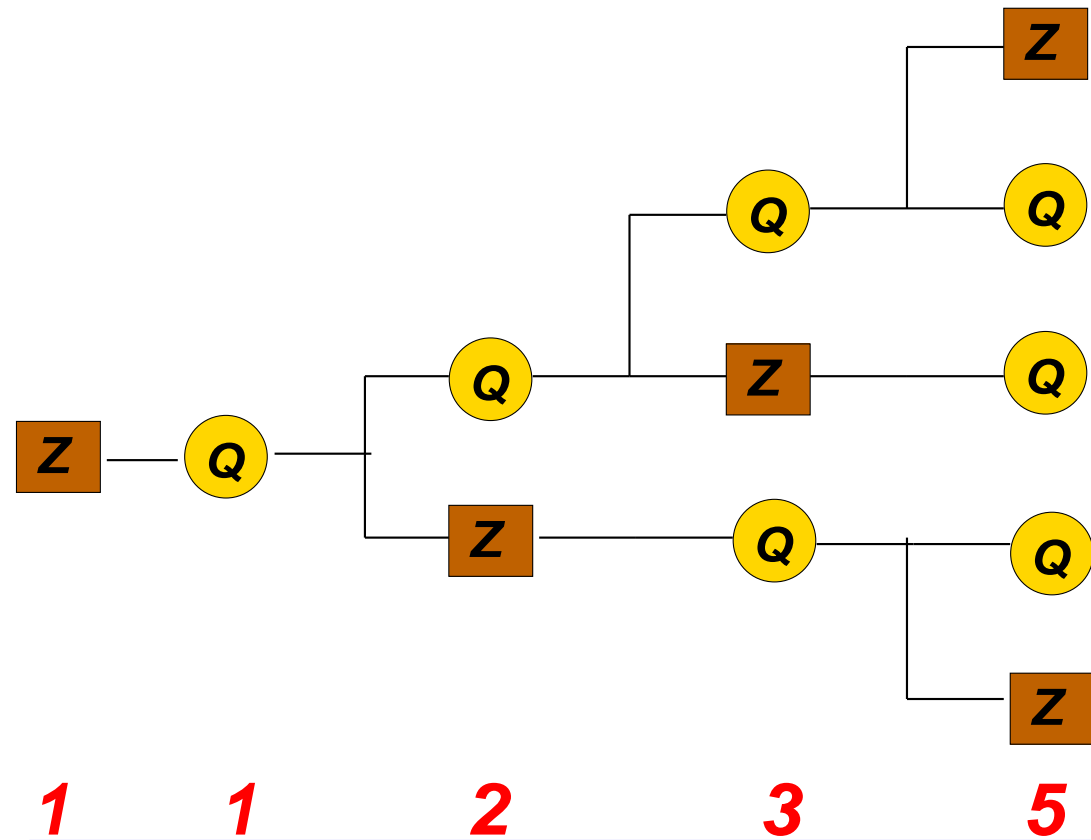
Obreira



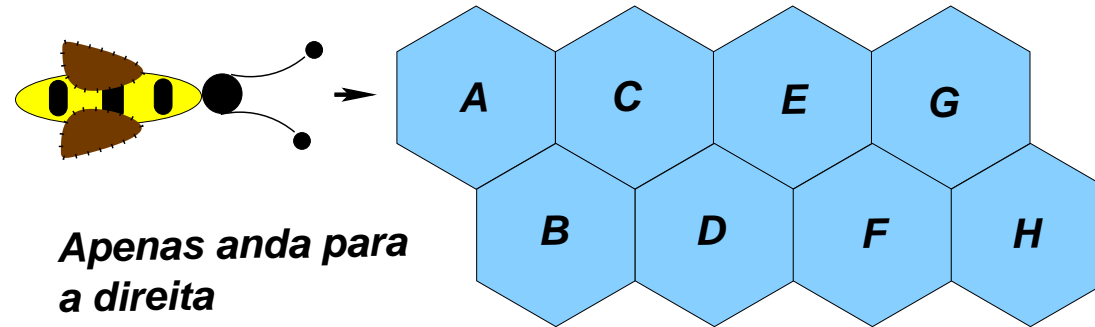
zangões não têm pai

As fêmeas têm pai e mãe

Árvore genealógica



Hexágonos e a SF: **1, 1, 2, 3, 5, ...**



só tem uma forma de ir para A $\implies 1$

só tem uma forma de ir para B $\implies 1$

tem duas formas de ir para C: A+C ou A+B+C $\implies 2$

tem três formas de ir para D: A+B+D, A+C+D, A+B+C+D $\implies 3$

tem cinco formas de ir para E $\implies 5$ (trabalho de casa!)

R. Eastaway and J. Wyhdham in *Why do buses come in threes?*

O grafeno, a matemática e a física

Cálculo do número π !

Imagens no visível

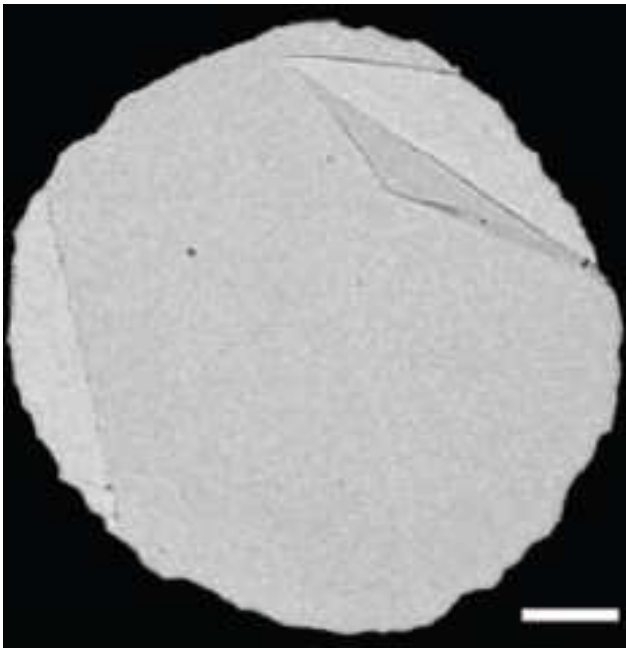
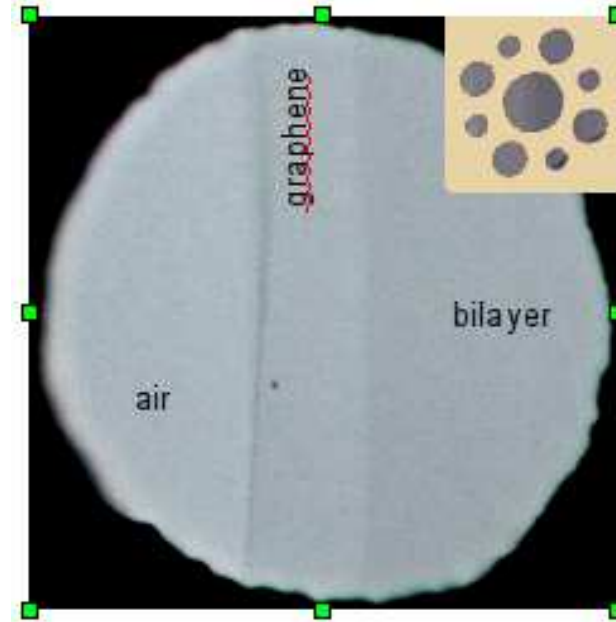


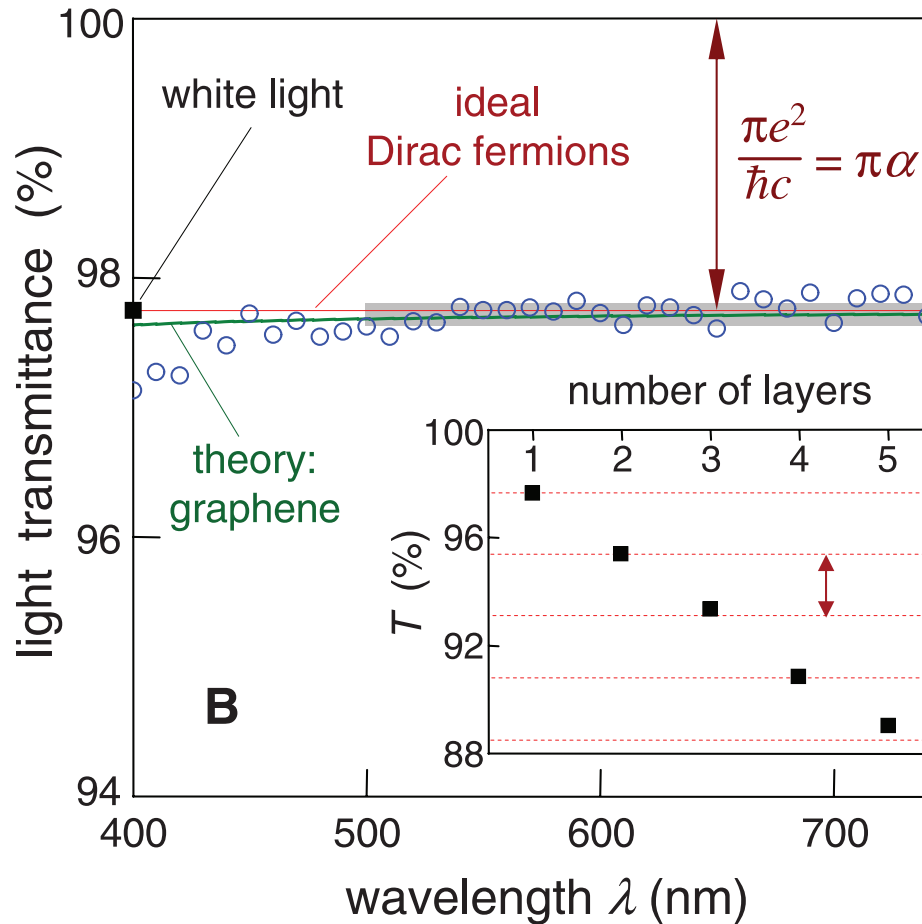
Imagem TEM de uma abertura de $30 \mu\text{m}$ parcialmente coberta com grafeno e sua bicamada.



Fotografia óptica de uma abertura de $50 \mu\text{m}$ parcialmente coberta com grafeno e sua bicamada.

$$\lambda_{\text{luz}} \sim 500 \text{ nm} = 0.5 \mu\text{m}$$

Resultados experimentais



$$T = 1 - \pi\alpha$$

$$\alpha \approx \frac{1}{137}$$

$$\pi = \frac{1-T}{\alpha} = \frac{1-0,977}{\frac{1}{137}} \approx 3.15$$

R. R. Nair *et al.* Science (2008).

Um pouco de física teórica

Vamos voltar à física da “casa de banho” ...



mas primeiro temos que fazer algumas revisões da
matéria dada e ... **questionar algumas ideias**

Energia da partícula livre

Qual é a expressão para a energia da partícula livre?

Será $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$? ($p = mv$) (Newton, Sec. XVII)

Energia da partícula livre

Qual é a expressão para a energia da partícula livre?

Será $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$? ($p = mv$) (Newton, Sec. XVII)

NÃO!

Energia da partícula livre

Qual é a expressão para a energia da partícula livre?

Será $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$? ($p = mv$) (Newton, Sec. XVII)

NÃO!

A resposta é: $E = \sqrt{m^2c^4 + c^2p^2}$ (Einstein, 1905).

Energia da partícula livre

Qual é a expressão para a energia da partícula livre?

Será $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$? ($p = mv$) (Newton, Sec. XVII)

NÃO!

A resposta é: $E = \sqrt{m^2c^4 + c^2p^2}$ (Einstein, 1905).

Hum ... ?! Como conciliar isto com que se aprende na escola: $\frac{1}{2}mv^2$?

Newton e Einstein



Woolsthorpe Manor

Expansão de Brook *Taylor* (1685-1731)



$$E = \sqrt{m^2c^4 + c^2p^2}$$

Expansão de Brook *Taylor* (1685-1731)



$$E = \sqrt{m^2c^4 + c^2p^2}$$

$$\Leftrightarrow E = mc^2 \sqrt{1 + \frac{c^2p^2}{m^2c^4}}$$

Expansão de Brook *Taylor* (1685-1731)



$$E = \sqrt{m^2c^4 + c^2p^2}$$

$$\Leftrightarrow E = mc^2 \sqrt{1 + \frac{c^2p^2}{m^2c^4}}$$

Se $\frac{p}{mc} \ll 1$ então:

$$\sqrt{1 + \frac{c^2p^2}{m^2c^4}} \simeq 1 + \frac{1}{2} \frac{c^2p^2}{m^2c^4}$$

Expansão de Brook *Taylor* (1685-1731)



$$E = \sqrt{m^2c^4 + c^2p^2}$$

$$\Leftrightarrow E = mc^2 \sqrt{1 + \frac{c^2p^2}{m^2c^4}}$$

Se $\frac{p}{mc} \ll 1$ então:

$$\sqrt{1 + \frac{c^2p^2}{m^2c^4}} \simeq 1 + \frac{1}{2} \frac{c^2p^2}{m^2c^4}$$

$$\Rightarrow E \simeq mc^2 + \frac{1}{2} \frac{p^2}{m}$$

Ou seja para baixas velocidades ...

Newton :

$$K = \frac{p^2}{2m}$$

Einstein ($mc \gg p$) :

$$E \simeq mc^2 + \frac{p^2}{2m}$$

Mas que acontece no caso da massa ser nula ($m = 0$)?

Ou seja para baixas velocidades ...

Newton :

$$K = \frac{p^2}{2m}$$

Einstein ($mc \gg p$) :

$$E \simeq mc^2 + \frac{p^2}{2m}$$

Mas que acontece no caso da massa ser nula ($m = 0$)?

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + c^2 p^2} \rightarrow \boxed{E = pc.}$$

Ou seja para baixas velocidades ...

Newton :

$$K = \frac{p^2}{2m}$$

Einstein ($mc \gg p$) :

$$E \simeq mc^2 + \frac{p^2}{2m}$$

Mas que acontece no caso da massa ser nula ($m = 0$)?

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + c^2 p^2} \rightarrow \boxed{E = pc.}$$

Como os fótons (γ) possuem massa nula então: $\boxed{E_\gamma = pc.}$

Ou seja para baixas velocidades ...

Newton :

$$K = \frac{p^2}{2m}$$

Einstein ($mc \gg p$) :

$$E \simeq mc^2 + \frac{p^2}{2m}$$

Mas que acontece no caso da massa ser nula ($m = 0$)?

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + c^2 p^2} \rightarrow \boxed{E = pc.}$$

Como os fótons (γ) possuem massa nula então: $\boxed{E_\gamma = pc.}$

Haverá outras partículas como massa igual a zero?

O menu das partículas

<http://particleadventure.org/particleadventure/frameless/chart.html>

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	<1x10 ⁻⁸	0	U up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	C charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	S strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

Structure within the Atom

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W^-	80.4	-1			
W^+	80.4	+1			
Z^0	91.187	0			

Color Charge
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for quarks. Just as electrically charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons
One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called hadrons. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figures below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** q \bar{q} and **baryons** qqq.

Residual Strong Interaction
The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property	Interaction	Gravitational	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
		Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Fundamental Residual
Acts on:		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Color Charge
Particles experiencing:		All	W^+ W^- Z^0	γ	Quarks, Gluons
Particles mediating:		Graviton (not yet observed)			Gluons
Strength relative to electromag for two u quarks at:		10 ⁻⁴¹	0.8	1	25
	10 ⁻¹⁸ m	10 ⁻⁴¹	10 ⁻⁴	1	60
	3x10 ⁻¹⁷ m	10 ⁻³⁶	10 ⁻⁷	1	Not applicable to hadrons
					20

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$

Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = s\bar{s}$) are their own antiparticles.

Figures
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.

Mesons q \bar{q}

Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.

Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	u \bar{d}	+1	0.140	0
K^-	kaon	s \bar{u}	-1	0.494	0
ρ^+	rho	u \bar{d}	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$\bar{d}\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	c \bar{c}	0	2.980	0

A neutron decays to a proton, an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β decay.

An electron and positron (antilepton) colliding at high energy can annihilate to produce B^+ and B^- mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.

Two protons colliding at high energy can produce various hadrons plus very high mass particles such as Z bosons. Events such as this one are rare but can yield vital clues to the structure of matter.

The Particle Adventure
Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:
U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:
<http://CPEPweb.org>

Schrödinger e Dirac

A energia das partículas sub-atômicas, quando é necessário física quântica:



Schrödinger e Dirac

A energia das partículas sub-atômicas, quando é necessário física quântica:



$$E = \frac{p^2}{2m}$$



$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

Algo de novo

Como interpretar estas novas energias negativas:

$$E = -\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} ?$$

Algo de novo

Como interpretar estas novas energias negativas:

$$E = -\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} ?$$

Em física de partículas elas são interpretadas como **antipartículas** !

Algo de novo

Como interpretar estas novas energias negativas:

$$E = -\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} ?$$

Em física de partículas elas são interpretadas como **antipartículas** !

No caso da massa ser nula teremos apenas

$$E = -pc$$

Algo de novo

Como interpretar estas novas energias negativas:

$$E = -\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} ?$$

Em física de partículas elas são interpretadas como **antipartículas** !

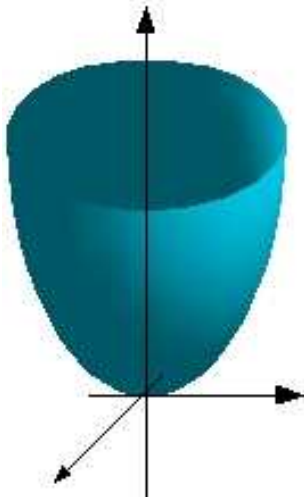
No caso da massa ser nula teremos apenas

$$E = -pc$$

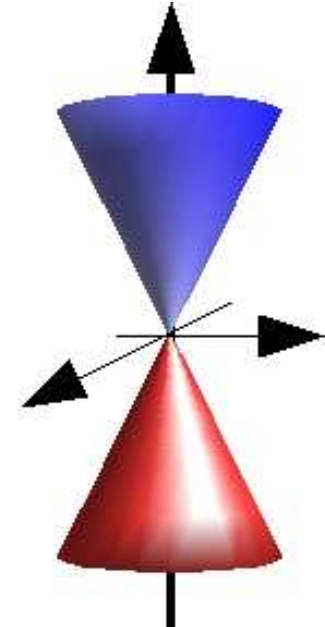
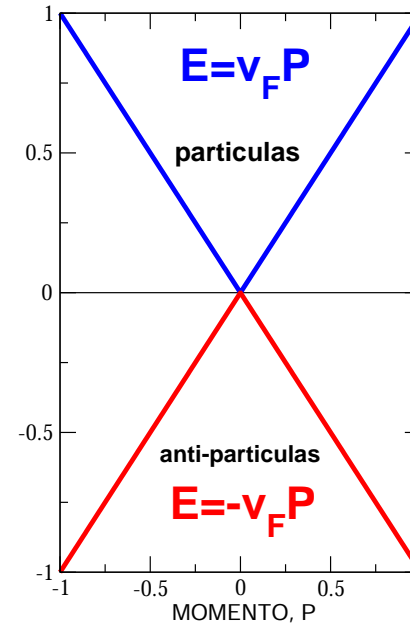
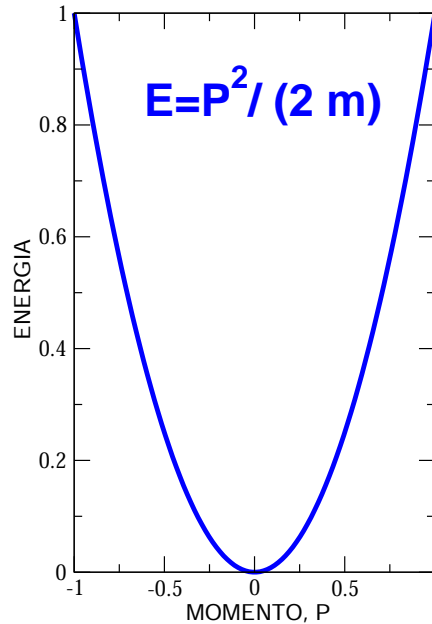
Mas para os fótons só existe $E = +pc!$

No grafeno é possível ter $E = \pm p v_F$

Sódio



$$E = \frac{p^2}{2m}$$



$$E = +p v_F$$

$$E = -p v_F$$

Há contudo uma diferença: $c \rightarrow v_F = c/300!$

Lembram-se?

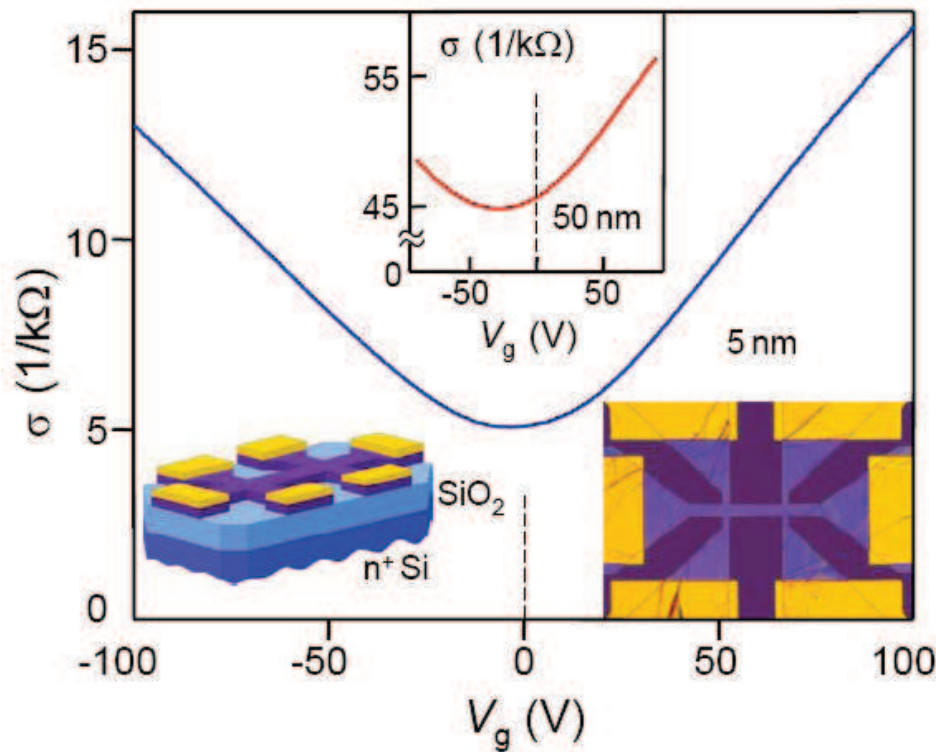
A física é uma ciência experimental.

Quais as evidências experimentais de que no grafeno há partículas e anti-partículas?

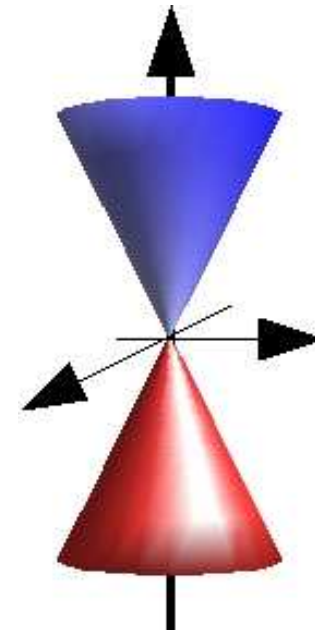
Evidência I

Temos evidência de duas bandas que se tocam?

Propriedades eléctricas: efeito de campo



Se $V_g > 0$, então há electrões até $E > 0$



Se $V_g < 0$, então só electrões abaixo de $E < 0$

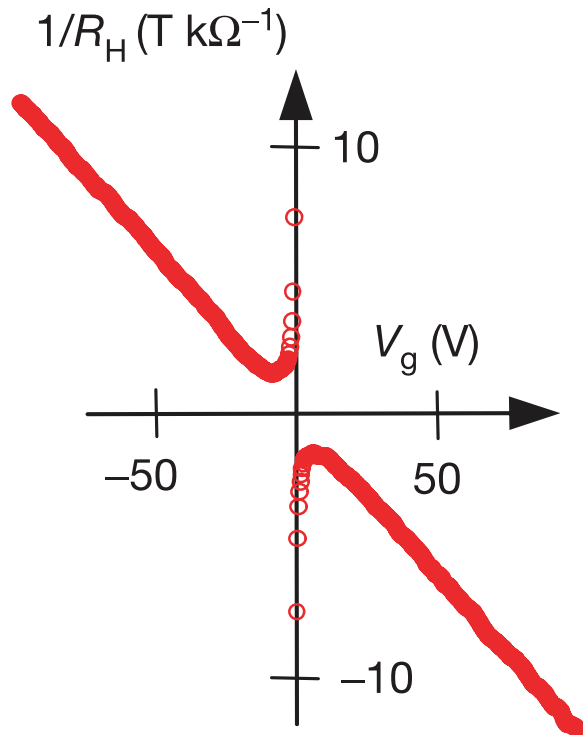
Evidência II

Temos evidência de partícula/anti-partícula?

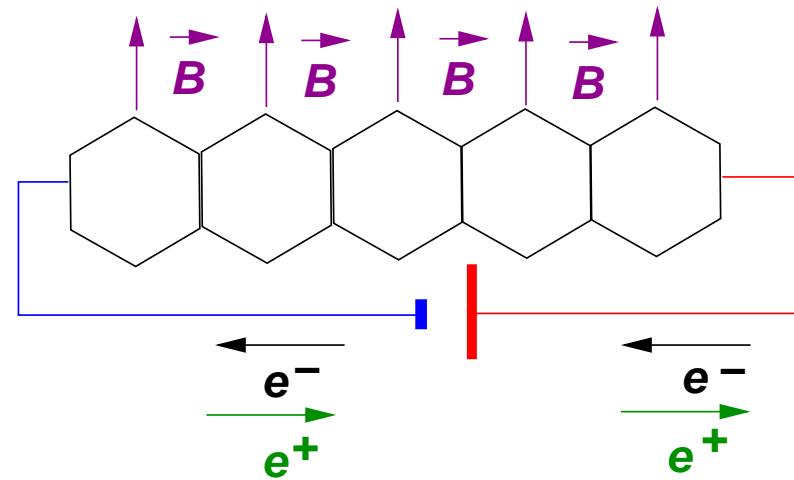
partículas são electrões \implies carga negativa

anti-partículas são anti-electrões \implies carga positiva

Propriedades eléctricas: tipos de portadores



cargas opostas

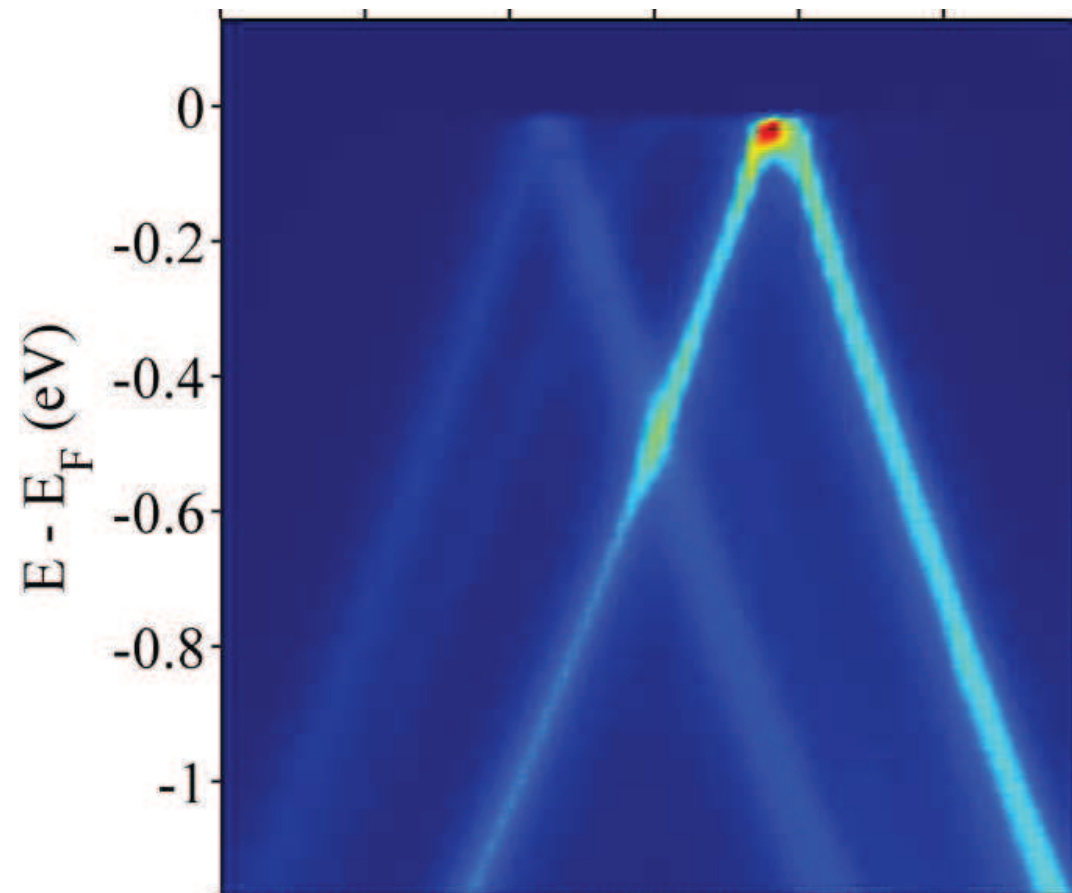


$$\frac{1}{R_H} = \text{densidade de carga} \times \text{carga}$$

Evidência III

Temos evidência directa da forma da energia?

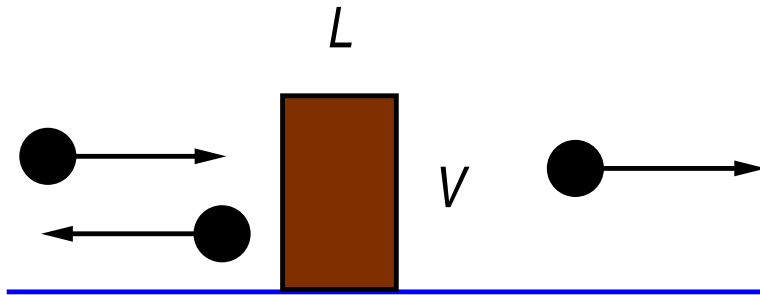
ARPES



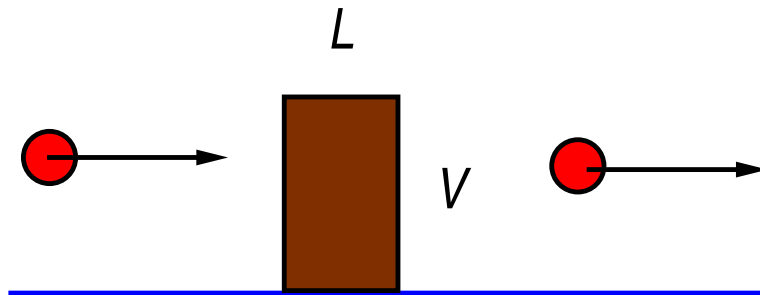
Obstáculos

E nada os pára!

Tunelamento de Klein

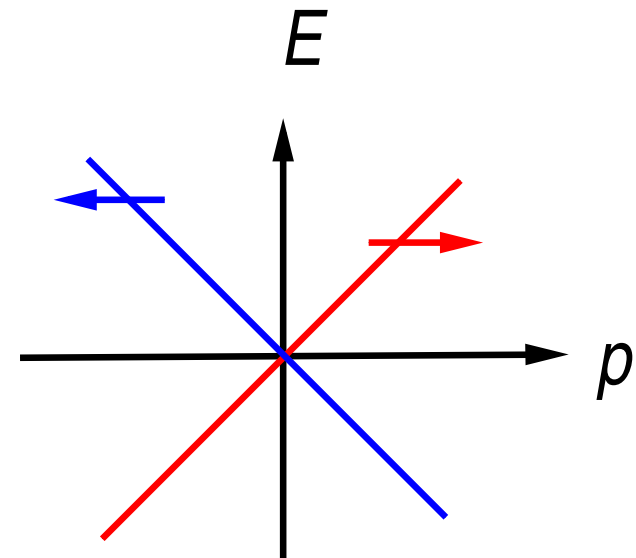


Electroes normais



Electroes de Dirac

$$P \sim e^{-2L\sqrt{2mV}}$$



Subindo na tabela periódica

32

Ge

Germanium

72



14

Si

Silicon

28.086



6

C

Carbon

12.011



Fim

Talvez nos voltemos a ver na FCUP daqui a 1 ou 2 anos ...